MODELO MATEMÁTICO DE RED DE BAJA TENSIÓN PARA SIMULACIÓN DE SISTEMAS DE GENERACIÓN FOTOVOLTAICA ACOPLADA A RED

Manuel Cáceres
GER - Grupo en Energías Renovables - FaCENA - UNNE. Campus Libertad - Av. Libertad 5460 - Corrientes.
chiro_frida@yahoo.com.ar
Exequiel Pinto[1], Luis H. Vera[2], Arturo J. Busso[3], Carlos Cadena[4]

Abstract *— En la generación descentralizada de energía eléctrica, utilizando sistemas fotovoltaicos conectados a la red (SFVCR) una de las cuestiones a tener en cuenta a la hora de analizar el aporte energético y ventajas de estos sistemas es la condición en que se encuentra la red de baja tensión vista desde el punto de interconexión eléctrica. El presente trabajo muestra un modelo matemático de la red de baja tensión, desarrollado a partir de datos de tensión, corriente sobre la carga, factor de potencia, etc, el cual se basa en un circuito eléctrico equivalente compuesto por una impedancia de línea en serie con un generador que representa la subestación transformadora. Este modelo representa a la red desde el punto de vista del dispositivo que realizará la interconexión entre el sistema fotovoltaico y el consumo (inversor), presentando la interacción entre las partes componentes del SFVCR y la red. El modelo formulado permite simular adecuadamente el acoplamiento de diferentes topologías de SFVCR así como de la impedancia característica de la red de distribución analizada.*

Palabras Claves*: Fotovoltaica - Modelo - Red Eléctrica - Simulación.*

Introducción:

Los sistemas de generación fotovoltaica pueden clasificarse en tres grandes grupos, que difieren entre si respecto del modo de empleo de la energía eléctrica generada [1]-[2]. Estos son: sistemas de generación autónomos o aislados, en los que la energía generada por módulos fotovoltaicos es almacenada en acumuladores (baterías) para luego ser empleada en instalaciones eléctricas que generalmente se encuentran aisladas de la red de distribución; sistemas de generación mixtos, que son un caso especial de los autónomos y cuya diferencia radica en que permiten el trabajo en conjunto con otra fuente de generación de energía eléctrica como por ejemplo la eólica, la hidráulica, etcétera [3] y sistemas de generación fotovoltaica conectados a red (SFVCR), que inyectan toda la energía generada a la red de distribución.

[1]Exequiel Pinto, Subsecretaria de Energía de la Provincia de Corrientes. exe_electrotecnia@hotmail.com.
[2]Luis H. Vera, GER - Grupo en Energías Renovables - FaCENA - UNNE. lh_vera@yahoo.com.ar.
[3]Arturo J. Busso, GER - Grupo en Energías Renovables - FaCENA - UNNE. ajbusso@gmail.com.
[4]Carlos Cadena, INENCO - CONICET - Departamento de Física - UNSa. cadena@inenco.net.

Los SFVCR [4] poseen la particularidad de que no precisan de acumuladores; sin embargo, necesitan de un sistema de conversión de potencia (Inversor) de corriente continua a corriente alternada [5], que debe ser capaz de adaptarse a las variaciones en la energía generada debida a cambios en la radiación solar así como también a las distorsiones ocasionadas por la interacción con la red de distribución eléctrica a la que se conecta. De hecho, las condiciones en que se encuentra la red de baja tensión varían con el tiempo, y resultan de importancia pues estas variaciones gobiernan, en parte, la eficiencia del sistema de conversión. Para lograr una previsión de las condiciones de trabajo del inversor y del sistema interconectado en general, se desarrolló, como primer paso, un modelo matemático preliminar de red de baja tensión con parámetros variables en el tiempo; desarrollado a partir de valores reales medidos [6]-[7] y seguidamente empleando el programa Matlab/Simulink para verificar su funcionamiento.
Por sus características, este modelo permitirá simular los efectos producidos por la interconexión del SFVCR con la red así como también obtener resultados acerca de las posibles mejoras que pueden surgir en la red a partir del empleo de este tipo de sistemas de generación [8].

Metodología:

El modelo presentado forma parte de un estudio para analizar el impacto de SFVCR dentro de la matriz energética regional. Este estudio es parte de un proyecto de instalación de un SFVCR en la fachada del Departamento de Física (Facultad de Ciencias Exactas - UNNE - Corrientes) que se encuentra en vías de desarrollo a cargo del Grupo en Energías Renovables (GER) en el marco de un proyecto de generación descentralizada de energía eléctrica. Por lo expuesto, considerando los objetivos del proyecto, se inició el estudio analizando la distribución de acometidas a los distintos departamentos de la FaCENA, ya que el modelo preliminar fue realizado examinando las condiciones de este edificio. Como primer paso se definió el entorno de estudio y se procedió a analizar únicamente la distribución de la red en el edificio de física. La Figura N°1 muestra como acometen los conductores tetrapolares a cada uno de los tableros principales (TP) y seccionales (TS) de los edificios, el edificio de física cuenta con tres tableros seccionales, uno en cada piso del establecimiento.
Partiendo del hecho de que el tramo de conductor comprendido entre la subestación transformadora (SET) y el tablero principal (TP) posee mayor longitud que los tramos TP-TS se consideró que la única impedancia de línea a tener en cuenta es la del tramo SET-TP

pudiendo despreciarse las demás. En otras palabras, consideramos que todos los tableros seccionales se encuentran conectados a una misma barra de distribución.

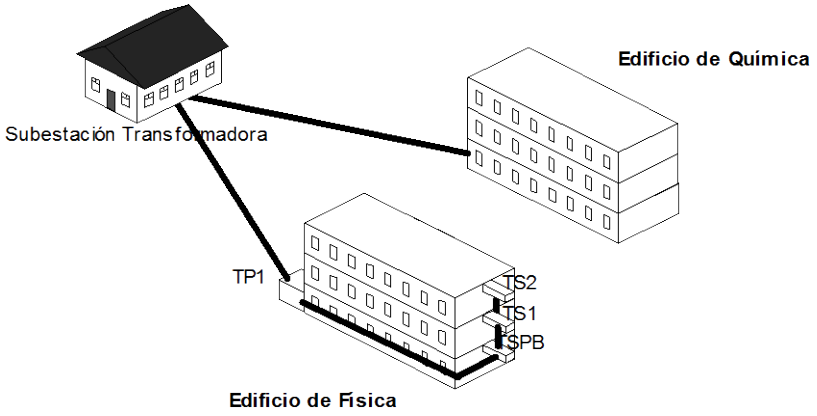


FIGURA. 1
Detalle de acometida de los edificios del departamento
de Física y departamento de Química.

A partir de esta consideración preliminar se puede definir una estructura circuital del modelo matemático como el presentado en la Figura N°2, en donde se muestra un esquema aproximado monofásico, cuyos parámetros representan la red de baja tensión. El modelo matemático propuesto consiste en un circuito equivalente de Thévenin que alimenta a las distintas cargas de cada tablero seccional, variables en el tiempo.

Este circuito equivalente representa a la SET en conjunto con los conductores de acometida. Se considera a la SET como una fuente de tensión alterna senoidal de frecuencia de 50Hz y amplitud de 311V. La impedancia serie del modelo queda determinada por las características físicas de los conductores de acometida.

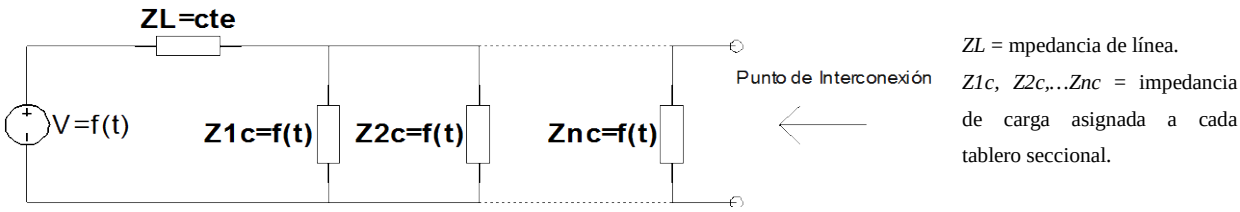
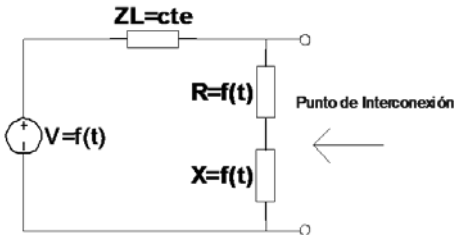


FIGURA. 2
Esquema eléctrico equivalente del modelo matemático propuesto.

Las actividades desarrolladas en cada uno de los pisos del departamento de física son aproximadamente las mismas, por ello se puede considerar que la carga asignada a cada TS

varía según una misma función. Partiendo de esta hipótesis se puede estudiar solamente uno de los tableros, permitiendo simplificar el modelo (Figura N°3). De esta forma la impedancia de carga puede ser representada por una resistencia función del tiempo en serie con una reactancia que también es función del tiempo y que puede ser inductiva o capacitiva según corresponda.

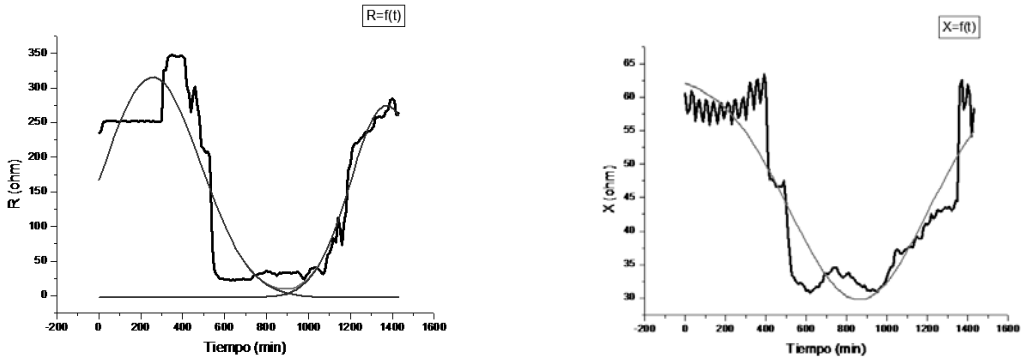


R = f(t): Resistencia variable con el tiempo.
X = f(t): Reactancia variable con el tiempo.

FIGURA. 3
Circuito equivalente simplificado.

Para determinar la variación de la carga en función del tiempo se realizaron mediciones, por un período de 5 meses, de los parámetros característicos de red en el TS del segundo piso empleando un analizador de calidad de energía marca *FLUKE modelo 1735* conectado a dicho tablero. Se midió tensión, corriente, potencia activa, reactiva y factor de potencia en intervalos de 10 minutos. A partir del análisis de los datos obtenidos se verificó que es suficiente representar la carga mediante funciones que describan su variación para dos tipos de consumo característicos, un día hábil (o de mucha actividad) y un día feriado o de fin de semana (o de poca actividad). Para obtener dichas funciones de demanda energética se caracterizó un día hábil y un día feriado a partir de un ajuste estadístico de los parámetros medidos. Dicho de otra manera, se tomaron todos los parámetros medidos para los días hábiles y se determinó un día medio, realizando el mismo proceso para obtener la función de demanda de los días feriados. Como el modelo propuesto es monofásico se repitió esta operación para cada fase.
La Figura N°4 presenta la variación de la resistencia y reactancia de carga para una fase en un día hábil. Se realizó el ajuste de una ecuación representativa de la demanda mediante el empleo de distribuciones de Gauss cuyo desvío respecto de la respuesta real son de orden pequeño, esto se debe en parte a que la variación de la demanda responde normalmente a una distribución de este tipo. Además, es importante destacar que el modelo busca simular las tendencias de la demanda y, teniendo en cuenta que el fenómeno engloba valores medios de

diferentes días, desarrollar un ajuste con mayor exactitud no representa un aporte tan importante para determinar la tendencia general del modelo.



(a) (b)

FIGURA. 4
Ajuste mediante gaussianas del perfil de demanda para un día típico. (a) Comportamiento resistivo de una fase. (b) Comportamiento de la reactancia de una fase

La impedancia serie del conductor de acometida queda definida a partir de sus dimensiones, la resistencia y la reactancia en función de la temperatura. Considerando que el conductor de acometida es tetrapolar subterráneo de 3 x 185 mm^2 + 1 x 95 mm^2, que posee una longitud de aproximadamente 148m y que tiene como parámetros característicos una resistencia de 0,137 Ω/Km y una reactancia de 0,07 Ω/Km a una temperatura de 30°C se determinó una impedancia serie constante constituida por una resistencia de 0,02 Ω en serie con una reactancia de 0.01 Ω.

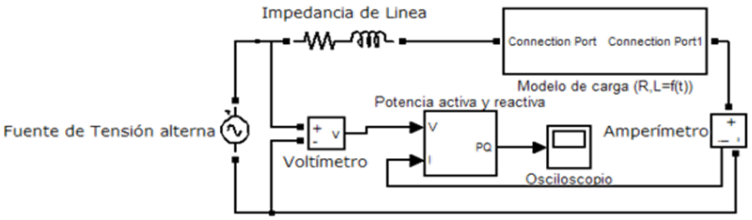


FIGURA. 5
Esquema de simulación en entorno Simulink/Matlab.

Para simular el modelo descripto por las ecuaciones y parámetros anteriormente citados se desarrolló un esquema de simulación empleando la herramienta Simulink de Matlab (Figura N°5). Este modelo está compuesto por una fuente de tensión senoidal en serie con la impedancia de línea y un subcircuito que representa la carga variable en el tiempo. El

subcircuito (figura N°6) fue diseñado como una fuente de corriente senoidal cuya amplitud y fase varían según una función matemática que depende de las variaciones que sufre la impedancia de carga en el tiempo.

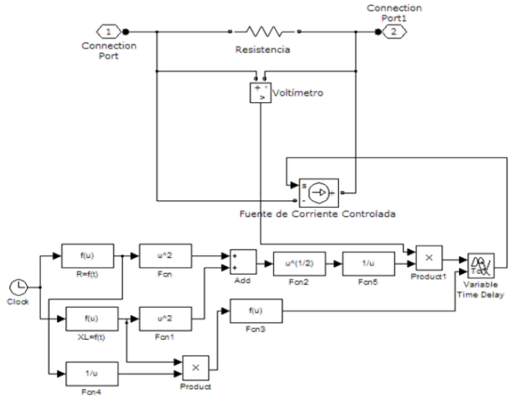


FIGURA. 6
Esquema en entorno Simulink del modelo de carga variable con el tiempo.

Resultados:

Las primeras simulaciones se realizaron considerando el tiempo equivalente a 1 día hábil y un día feriado. A partir del empleo de distintos módulos de medición contenidos en el entorno de programación citado, se pudieron determinar los valores de cada parámetro eléctrico del sistema. La Figura N°7 presenta el gráfico proporcionado por el programa que permite observar la variación de la corriente eficaz y el valor instantáneo de la potencia activa y reactiva sobre la carga a lo largo de un día hábil.

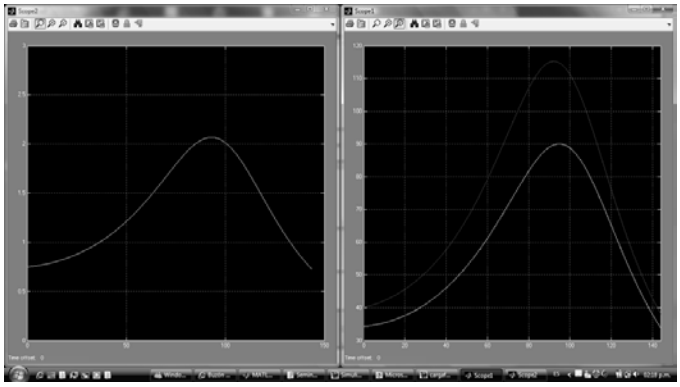


FIGURA. 7
Curvas que describen el comportamiento de la corriente eficaz, potencia activa y potencia reactiva para un día hábil.

Conclusiones:

A través del desarrollo y simulación del modelo matemático se llegó a las siguientes conclusiones:

El modelo, así como fue implementado, es versátil y permite simular diversas condiciones de carga sin limitar únicamente su empleo al caso en estudio.

Las desviaciones medias obtenidas respecto de valores reales se encuentran dentro de un entorno adecuado considerando que se trabaja con un modelo eléctrico equivalente simplificado.

La disposición empleada para simulación permite el futuro acoplamiento de un modelo de sistema de generación fotovoltaica a fin de caracterizar la interacción red – SFVCR.

El desarrollo del modelo matemático de sistema fotovoltaico conectado a red esta en su etapa final y se pretende simular la interacción del conjunto en poco tiempo.

Referencias Bibliográficas:

[1] Luzi Clavadetscher, **"Country Reports on PV System Performance"**, *Report IEA-PVPS* T2-05: 2004.
[2] Ulrike Jahn, Bodo Grimmig, Wolfgang Nasse, **"Analysis of photovoltaic Systems"**, *Report IEA-PVPS* T2-01: 2000.
[3] O. C. Onar, M. Uzunoglu, M. S. Alam, **"Modeling, control and simulation of an autonomous wind turbine/photovoltaic/fuel cell/ultra-capacitor hybrid power system"**, *Journal of Power Sources*, 2008.
[4] Dias, J. B., Silvério, W. V., Krenzinger, A., **"Simulação dos índices da Performance Energética para uma Instalação Fotovoltaica Conectada à Rede em Diferentes Locais"**, *I Congresso de Energia Solar*, Fortaleza, Brasil, 8-11 de abril 2007.
[5] Tadao Ishikawa, **"Grid-connected photovoltaic power systems: Survey of inverter and related protection equipment"**, *Report IEA PVPS* T5-05: 2002.
[6] Hoyos L., Cadena C., Hoyos D., **"Optimización del Consumo Eléctrico de una Red Trifásica de Potencia, Por Evaluación del Comportamiento de sus Impedancias Variables y Complejas"**, *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente, Vol 2, N°2, ASADES* 1998.
[7] Morán F., Facchini M., Pontoriero D., Doña V., **"Inserción de Generación Distribuida a Travez de Instalaciones Fotovoltaicas Domiciliarias Ajustadas a las Curvas Típicas de Demanda Residencial"**, *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente, Vol 13, ASADES* 2009.
[8] Canova A., Giaccone L., Spertino F., Tartaglia M., **"Electrical Impacto of Photovoltaic Plant in Distributed Network"**, *IEEE*, 2007.